干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于遥感生态指数的吐哈地区生态环境变化研究

王瑾杰[1,2,3]， 丁建丽[1,2,3]， 张子鹏[1,2,3]

（1. 新疆大学地理与遥感科学学院,新疆 乌鲁木齐 830017；2. 新疆大学新疆绿洲生态重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830017；3. 新疆智慧城市与环境建模普通高校重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830017）

摘 要：以吐鲁番市和哈密市(简称吐哈地区)为研究对象,基于MODIS多光谱传感器2000、2006、2012年和2018年的遥感数据,采用4个表征湿度、干度、热度和绿度的指数,建立和绘制吐哈地区多个时期的遥感生态指数(Remote sensing ecology index,RSEI),并对该地区的生态环境质量及土地利用转换情况进行了定量分析。结果表明:近20 a来,吐哈地区的绿度指数平均增加0.0244,热度指数平均降低0.0241,而湿度和干度指数整体的变化接近于0;其中,热度指数与RSEI具有负相关性。总体而言,2000—2018年吐哈地区的生态环境质量表现为略微下降的趋势;其中,吐鲁番市的鄯善县RSEI变化幅度最大,环境质量表征数据在区域下降幅度中排列首位,哈密市的巴里坤哈萨克自治县环境质量减少的幅度最小。近20 a来,吐哈地区的草地面积有明显增加,但需控制草地开垦及过度放牧,防止区域生态环境恶化。

关 键 词：遥感生态指数；MODIS数据；时空变化；吐鲁番市；哈密市

文章编号：

自然生态系统是人类生存和发展的基础[1]。近年来,人类日益强大的经济活动改变了周边生态环境和土地利用方式,对生态系统稳定性产生了巨大影响[2]。因此,客观有效的评价某一区域生态环境质量的时空变化,是区域坚持走绿色发展道路的指南针。

目前,遥感信息技术以其快速、无损、及时和高分辨率等优势,成为环境监测和质量评价研究中不可或缺的关键技术[3]。其中,顾留碗等[4]采用植被指数与像元二分模型相结合的方式监测植被覆盖度,以此对安徽省生态环境进行综合评价。戚曌等[5]以3期Landsat遥感影像为研究基础,采用差分分析法定量评价神农架地区生态环境恢复治理状况。但上述研究均基于单一环境因子的时空变化研究,没有进行多角度的客观评价。针对这一问题,前人根据4种人类最易感知的环境变量(干度、湿度、热度和绿度指数),通过主成分分析(Principal component analysis,PCA)技术构建适合吐哈地区的遥感生态指数(Remote sensing ecology index,RSEI)。该指数所包含信息来自MODIS遥感影像及其衍生产品,因此可保证计算结果的客观性,目前基于该指数的生态环境评价模式已得到广泛应用[6]。例如,周萌等[7]利用RSEI对东江源区域2000—2019年近20 a的生态环境变化进行评估,发现人类活动导致建设城市用地增加是造成该地区生态环境质量变化的关键因素;徐敏等[8]以Sentinel-2A、Landsat8等遥感影像为基础,利用RSEI对滁州市2016—2020年4 a间生态环境的时空变化进行分析,发现该地区生态环境质量整体略呈下降趋势。深入分析研究发现,关于RSEI的应用研究多集中在我国中部和东部地区,而对于我国西北地区的关注度相对较低,而西北地区作为我国重要的生态屏障,生态环境指数监测必不可少。

吐鲁番市和哈密市(简称吐哈地区)地处西北早中侏罗世含煤盆地,煤炭、石油等矿产资源十分丰富,具备工业大发展的先天资源禀赋,特色瓜果

收稿日期：2022-07-10； **修订日期：**2022-07-28

基金项目：国家自然科学基金联合基金重点项目(U2003202);重点实验室开放课题(2020D04038)资助

作者简介：王瑾杰(1982-),女,副教授,主要从事干旱区资源与环境遥感研究. E-mail: wangjj@xju.edu.cn

通讯作者：丁建丽(1974-),男,教授,主要从事智能空间信息技术和干旱区地学研究. E-mail: watarid@xju.edu.cn

农业和旅游业发展具有前景。同时也是我国重要的交通枢纽以及丝绸之路经济带中的核心区。然而,近40 a以来随着经济社会的不断发展,吐哈地区的天然来水量十分有限,加之水资源开采程度不断加剧,地表水引用率远超一般河流40%的生态阈值,地下水超采现象严重,由自然和人类活动双重因素造成一系列生态环境问题:土地沙漠化、湿地退化、盐尘暴频发等现象导致生态环境持续恶化[9-10]。因此,本研究基于对吐哈地区RSEI和土地利用数据时空变化的定量分析,对该地区近20 a生态环境情况进行综合评估。

1 研究区概况

吐哈地区(41°18′~43°43′N,86°40′~96°04′E)是吐鲁番市(包括高昌区、鄯善县和托克逊县)和哈密市(包括伊州区、巴里坤哈萨克自治县和伊吾县)的统称,位于欧亚大陆腹地,四面环山,面积约1.2×10^5 km^2(图1)。该地区夏季高温干旱、降水稀少(年平均降水量<50 mm)且蒸发强烈(年平均蒸发量>2000 mm),致使水资源极度短缺、植被稀疏、土地荒漠化严重、生态系统极其脆弱[11-12]。

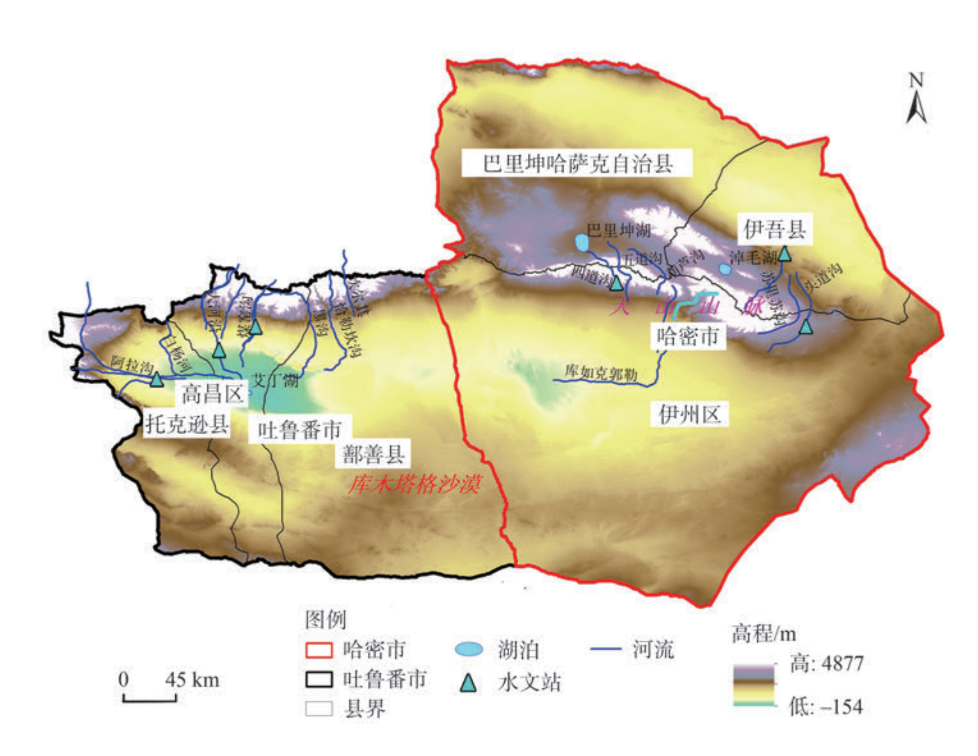
2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究旨在构建吐哈地区4个时期的RSEI,其底图数据(MODIS数据)来自于LAADS DAAC平台(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/)。不同时期的土地利用数据来自于1990—2020年中国30 m空间分辨率的土地利用数据集(https://zenodo.org/record/5210928#.YdJoJci4z9h),该数据集以335709张Landsat遥感影像为数据源,并通过人工目视解译获取。

2.2 研究方法

2.2.1 遥感生态指数(RSEI)的建立与评价 大量研究结果表明,热度、绿度、湿度和干度指数是与生态环境质量直接相关的4个评价指数[13-15]。而RSEI正好通过这4个评价指数来构建,以表征生态环境的质量变化。通过查阅文献,本研究发现湿度指数可以通过对遥感影像进行缨帽变换后获得;热度和绿度指数分别以地表温度(Land surface temperature, LST)和归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)为表征;而对于干度指数,本



注:该图基于自然资源部地图技术审查中心网站下载的审图号为GS(2020)4632号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

研究采用建筑和裸土指数(Normalized difference built-up and bare-soil index, NDBSI)来构建[16]。基于此，RSEI可以表示为 G, W, T, D 4个指数的函数，即：

$$RSEI = f(G, W, T, D) \tag{1}$$

其具体的表达式为：

$$RSEI = f(NDVI, Wetness, LST, NDBSI) \tag{2}$$

式中：RSEI为遥感生态指数；G为绿度指数；W为湿度指数；T为热度指数；D为干度指数；NDVI为植被指数；Wetness为湿度分量；LST为地表温度；NDBSI为建筑和裸土指数。

(1) 湿度指数：缨帽变换可以对遥感数据进行有效的降维[17]，由于其变换后获得的分量与生态环境参数(如湿度、亮度和绿度参量)具有较强的解释性，因此该技术常用于RSEI协变量的提取。其中，湿度分量与植被和土壤湿度密切相关，因此本研究的湿度指数以湿度分量(Wetness)来代表，其表达式为：

$$Wetness = 0.26\rho_1 + 0.21\rho_2 + 0.09\rho_3 + 0.07\rho_4 - 0.76\rho_5 - 0.53\rho_7 \tag{3}$$

式中：ρ_i (i=1, 2, …, 7)分别为MODIS影像各波段的反射率(%)。

(2) 绿度指数：NDVI是广泛应用的植被指数，它与植被的叶面积、生物量和植被覆盖度都有密切关系[18]。因此，本研究选用NDVI来表征绿度指数，其计算公式为：

$$NDVI = (\rho_4 - \rho_3)/(\rho_4 + \rho_3) \tag{4}$$

式中：ρ_3 和 ρ_4 分别为MODIS多光谱传感器的红波段和近红外波段的反射率(%)。

(3) 热度指数：

$$L_6 = gain \times DN + bias \tag{5}$$

$$T = K_2 / \ln(K_1 / L_6 + 1) \tag{6}$$

式中：L_6 为MODIS多光谱传感器在第6波段处的辐射值(J)；DN为无量纲的像元亮度值($cd \cdot m^{-2}$)；gain和bias分别为第6波段的增益值与偏置值；T为传感器处温度值；K_1 和 K_2 分别为对应的定标参数。

为了获得该地区的LST，还需要对 T 进行发射率校正，具体如下：

$$LST = T/[1 + (\lambda T/\rho)\ln\varepsilon] \tag{7}$$

式中：λ 为MODIS多光谱传感器在第6波段的中心波长；ρ为常量；ε 为发射率(W)。

(4) 干度指数：

$$NDBSI = \frac{IBI + SI}{2} \tag{8}$$

式中：IBI为表征城市建筑情况的建筑指数；SI为土壤指数。

为了计算RSEI还需要对计算得到的4个指数叠加进行主成分分析。需要注意的是，由于计算得到的4个指数的量纲各不相同，如果直接进行主成分分析，会严重影响RSEI的计算结果，因此本研究对各指数进行归一化处理。

由于4个时期第一主成分(PC_1)的方差贡献率超过80%，因此本研究仅选取PC_1来表征吐哈地区的生态环境质量。为了便于不同学者之间的比较和交流，本研究对RSEI进行了进一步标准化处理。RSEI即为最终所建立的RSEI(范围0~1)，RSEI值越接近1，表示其生态环境质量越好，反之亦然。

$$RSEI = 1 - \{PC_1[f(NDVI, Wetness, LST, NDBSI)]\} \tag{9}$$

以上计算均在MATLAB2021a (The MathWorks, Natick, MA, USA)中通过编程实现，其中主成分分析和归一化分析利用pca和mapminmax函数实现。

2.2.2 土地利用及其转移矩阵计算 由于土地利用数据的空间分辨率为30 m[19]，为了匹配RSEI本研究将土地利用数据重采样到1000 m。转移矩阵是定量分析土地利用变化的常用技术[20-24]。本研究在MATLAB2021a版本中计算了吐哈地区近20 a的土地利用转移情况。

3 结果与分析

3.1 吐哈地区生态环境的时空分布

由绿度指数(图2)可知吐哈地区的植被覆盖较低，并仅有少量植被呈片状集中分布于哈密市伊州区、伊吾县和吐鲁番市北部的山区。对比不同时期绿度指数发现，随时间的推移(2000—2018年)吐哈地区生态系统的绿度逐渐增加，其绿度指数的均值从2000年的0.1015增加到2018年的0.1259(表1)。吐鲁番市的绿度指数总体上低于哈密市。

吐哈地区湿度指数的时空分布情况如图3所示。湿度指数高值区主要集中在吐鲁番市的山区及哈密市北部，低值区相间分布在南部的荒漠及其交错带区域。经统计得到2000—2018年吐哈地区的湿度指数平均值分别为0.3158、0.3134、0.3626、0.3240，在2000—2018年整体呈现增加趋势(表1)。2012年平均湿度相对较高，这与2012年温度升

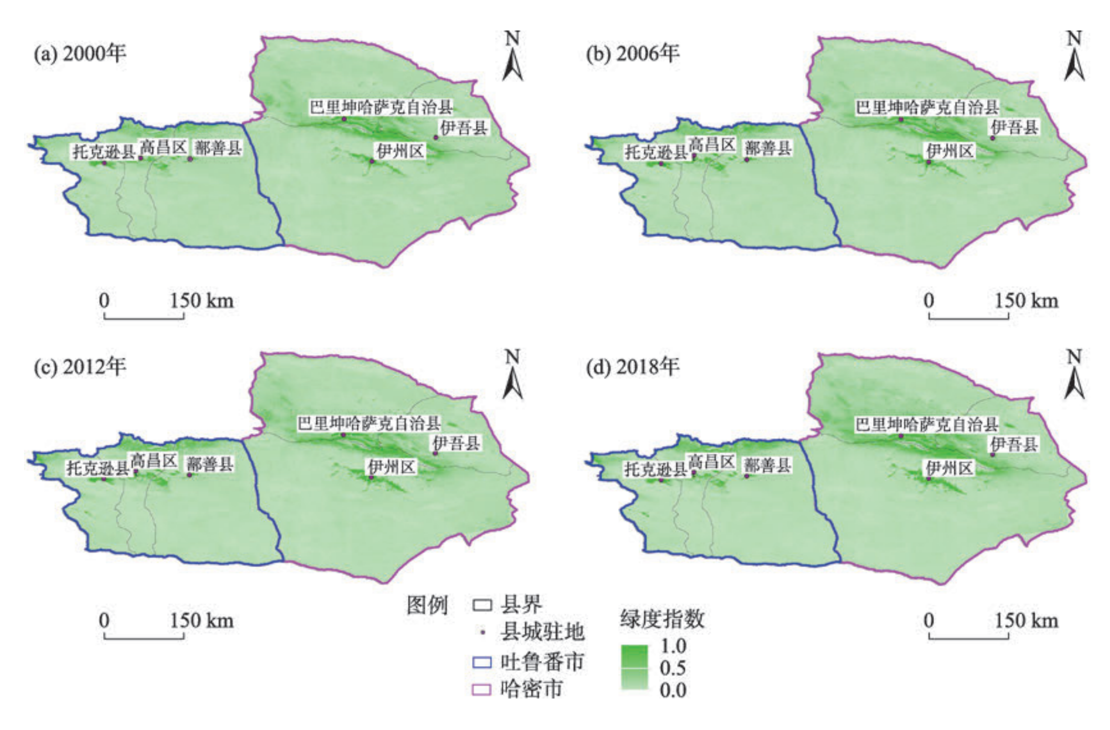


图2 2000—2018年吐哈地区绿度指数空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of greenness index in Turpan and Hami cities from 2000 to 2018

表1 2000—2018年吐哈地区各指数的统计分析

Tab. 1 Statistical analysis of each index in Turpan and Hami cities from 2000 to 2018

年份	统计参量	绿度指数	湿度指数	干度指数	热度指数	RSEI
2000	均值	0.1015	0.3158	0.6503	0.7538	0.1745
	标准差	0.1010	0.0912	0.0587	0.1205	0.1267
2006	均值	0.1060	0.3134	0.6671	0.7392	0.1815
	标准差	0.1065	0.0894	0.0579	0.1189	0.1281
2012	均值	0.1102	0.3626	0.6358	0.7253	0.1820
	标准差	0.1159	0.0974	0.0622	0.1208	0.1353
2018	均值	0.1259	0.3240	0.6627	0.7297	0.1709
	标准差	0.1292	0.0907	0.0706	0.1261	0.1415

注：RSEI为遥感生态指数。下同。

高导致融雪径流增加有关。

吐哈地区干度指数的时空分布情况如图4所示，吐哈地区的干度指数整体呈现较高态势，仅有部分低值区域分布在市县周边。2000—2018年吐哈地区土壤干度指数平均值分别为0.6503、0.6671、0.6358、0.6627（表1）。整体上，区域内干度指数呈现波动且略微增加趋势，其中以2006年和2018年平均干度值最大，表明在这2个时期存在一定的水土流失状况，与研究区内部土地利用密切相关。

吐哈地区热度指数的时空分布情况如图5所示，高温区域主要分布在南部的荒漠区域而低温区域主要分布在北部山区（图5）。吐哈地区的热度在时间上存在降低趋势，即从2000年的热度平均值0.7538下降到2018年的0.7297（表1）。

2000—2018年近20 a吐哈地区RSEI的演变情况如图6所示。整体上来看其高值区（RSEI>0.5）主要集中在农田绿洲区和山区附近。研究发现吐哈地区的生态环境质量没有明显差异，即RSEI的均值变化较小（约0.01）（表1）。

鉴于此，本研究对吐哈地区各县市的RSEI均值进行进一步的统计分析（表2）。总体来说，所有地区的生态环境质量呈现先降低（2000—2006年）后

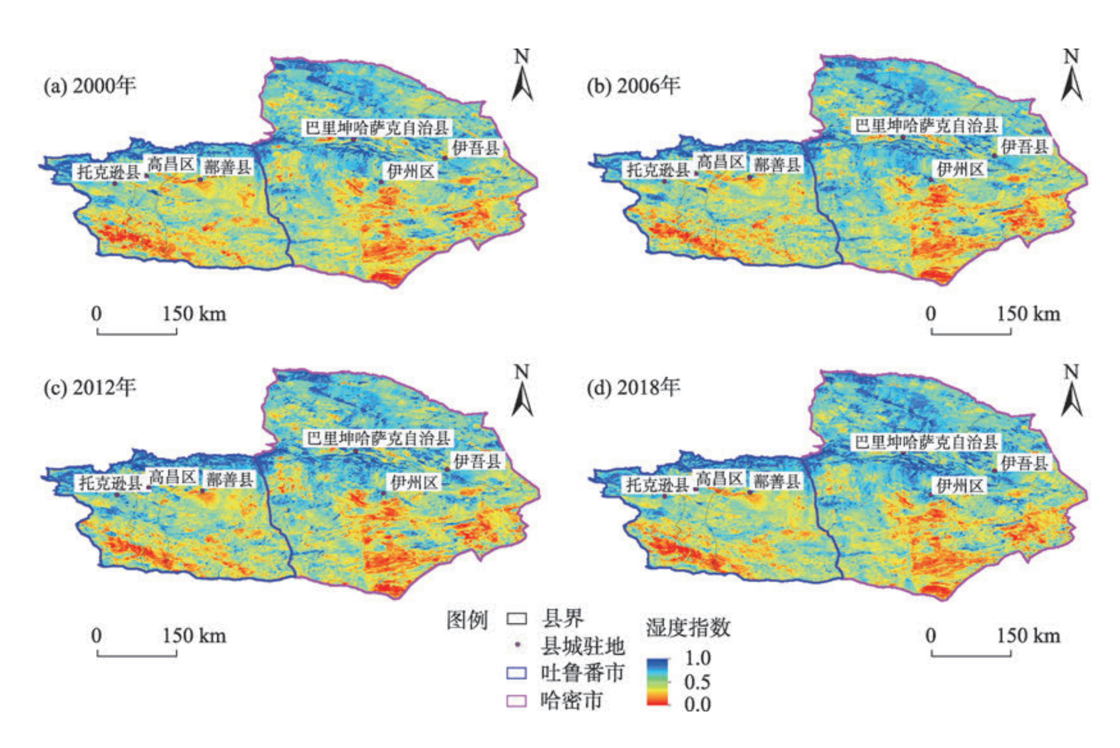


图3 2000—2018年吐哈地区湿度指数空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of wetness index in Turpan and Hami cities from 2000 to 2018

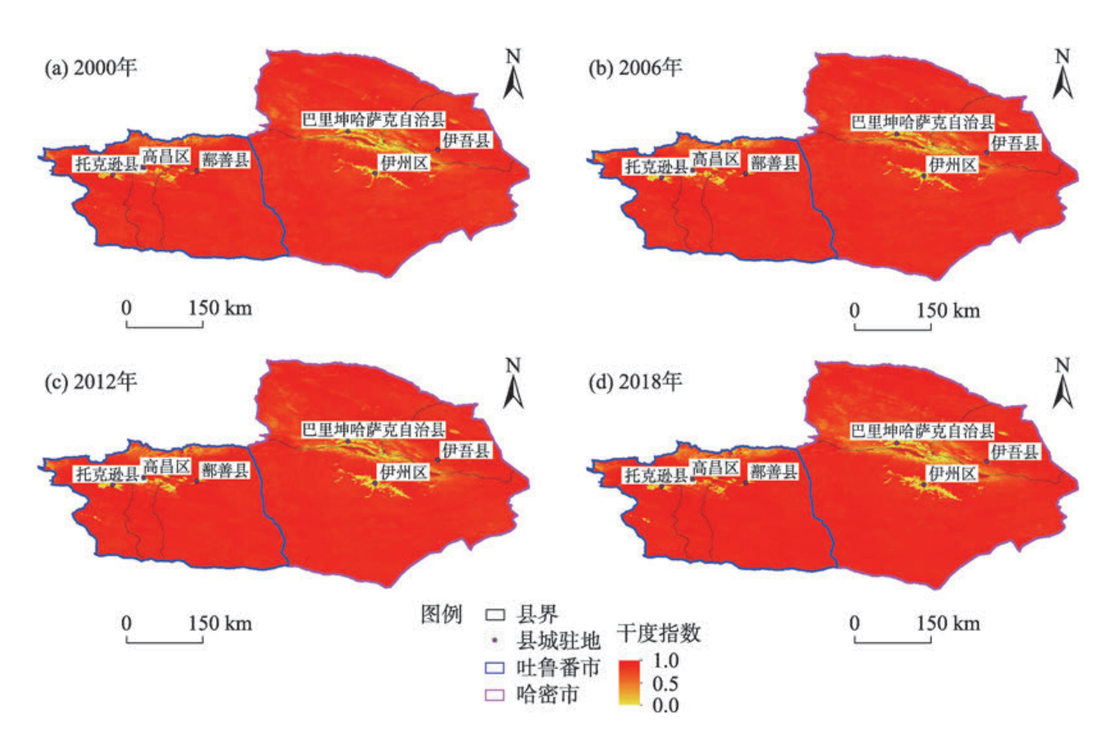


图4 2000—2018年吐哈地区干度指数空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of dryness index in Turpan and Hami cities from 2000 to 2018

增加(2006—2012年)再降低(2012—2018年)的变化趋势,但变化幅度相对较低(约0.03)。所有地区的RSEI均值均在2012年最高,这表明2006—2012年吐哈地区的生态环境质量有明显的改善。与哈密市相比,吐鲁番市生态环境质量的波动相对较大,尤其是鄯善县。

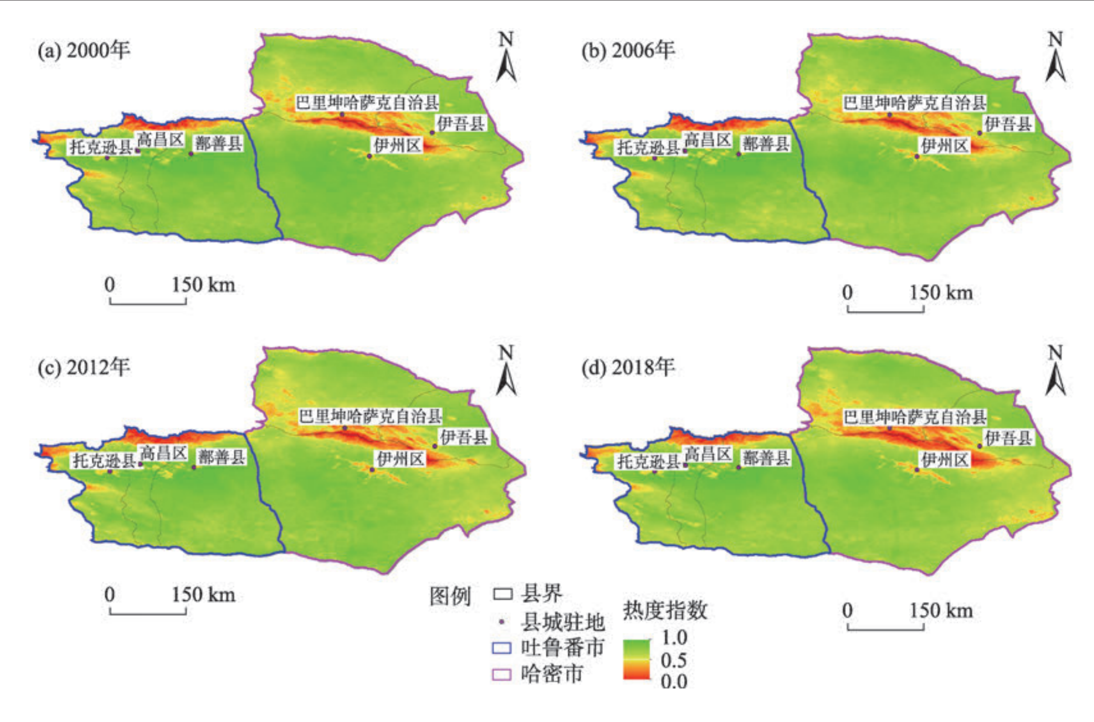
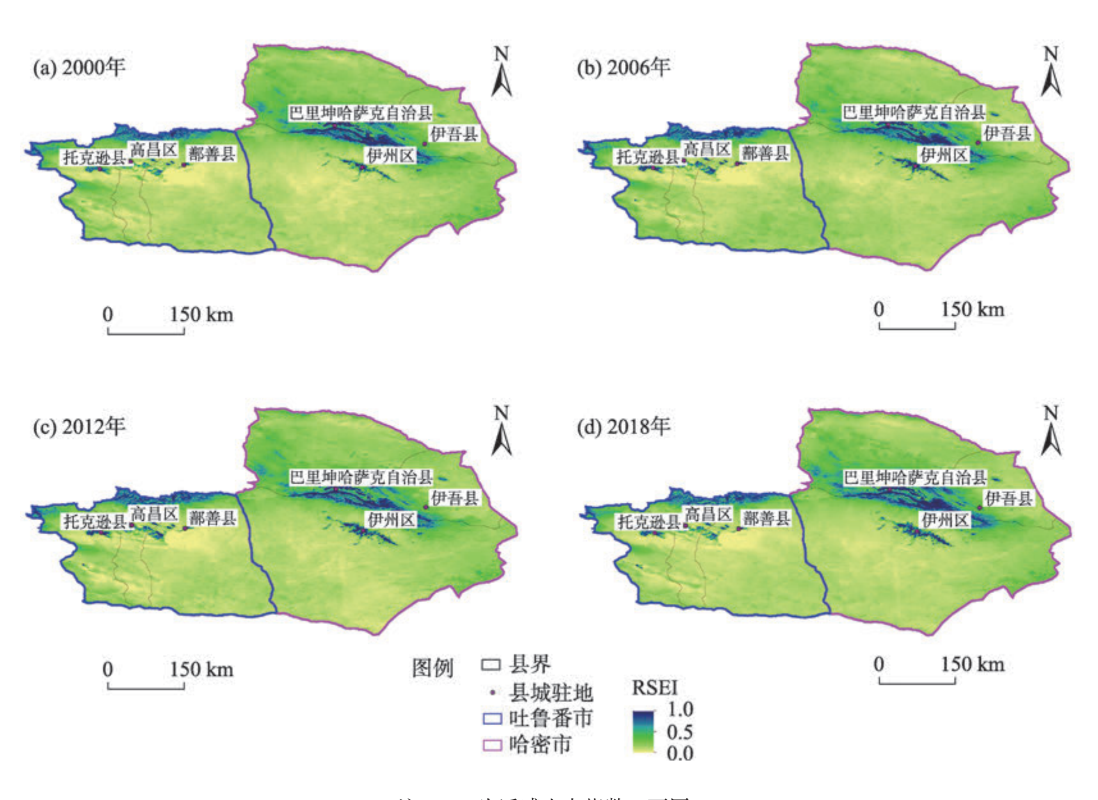


图5 2000—2018年吐哈地区热度指数空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of heat index in Turpan and Hami cities from 2000 to 2018



注:RSEI为遥感生态指数。下同。

图6 2000—2018年吐哈地区RSEI空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of remote sensing ecological index (RSEI) in Turpan and Hami cities from 2000 to 2018

3.2 RSEI与各指数的相关性分析

RSEI与各指数的全局相关性分析如表3所示。研究发现RSEI与绿度和湿度指数呈现显著正相关关系(P<0.001),而与热度和干度指数则相反。与湿度指数相比,绿度与RSEI在吐哈地区具有相对较强的正相关性,尤其在2018年。而4个时期,热

表2　不同时期吐哈地区各县区的RSEI均值

Tab. 2　Mean values of RSEI in counties and distvicts of Turpan and Hami cities at different periods

县(区)	2000年	2006年	2012年	2018年
高昌区	0.47	0.45	0.48	0.44
鄯善县	0.45	0.43	0.47	0.41
托克逊县	0.46	0.44	0.47	0.43
伊州区	0.47	0.45	0.49	0.44
巴里坤哈萨克自治县	0.45	0.42	0.46	0.43
伊吾县	0.45	0.42	0.46	0.42

表3　不同时期RSEI与各指数的相关性

Tab. 3　Correlation between RSEI and various indices at different periods

年份	绿度指数	湿度指数	干度指数	热度指数
2000	0.8514	0.4289	−0.7885	−0.9134
2006	0.8702	0.3634	−0.8154	−0.8910
2012	0.8513	0.4342	−0.8519	−0.8777
2018	0.9139	0.4334	−0.8744	−0.8885

度指数与RSEI在吐哈地区均具有最强的相关性，这表明热度指数是主导吐哈地区生态环境质量的主控因子。

3.3　不同时期生态环境质量的时空变化

吐哈地区绿度指数的时空变化情况如图7所示。近20 a吐哈地区有72%的区域呈现绿度增加趋势，只有吐哈地区北部的部分地区呈现微弱的降低趋势(0~0.2)。其中，吐鲁番市北部和哈密市周边呈现明显的绿度增加，增幅为0.4~0.6。吐哈地区绿度指数平均增加0.0244(表4)，其中2018—2012年的增幅次之，达到0.0157。

2006—2012年吐哈地区有91%的区域出现湿度增加趋势，其中巴里坤哈萨克自治县的东南部增幅达到0.2~0.3(图8)；而2012—2018年有86%的区域呈现湿度降低趋势。但总体表现为，近20 a来吐哈地区有59%的区域呈现湿度增加，其中哈密市中部相对较高(增幅0.2~0.3)。湿度指数整体的变化接近于0(表4)，这表明2006—2012年湿度指数的增幅被2012—2018年的整体降低所抵消。

吐哈地区2000—2006年和2006—2012年的干度指数变化存在相反的趋势(图9)。其中，2000—2006年为整体增加(95%区域)，而2006—2012年则基本为降低趋势(98%区域)。但总的来说，近20 a

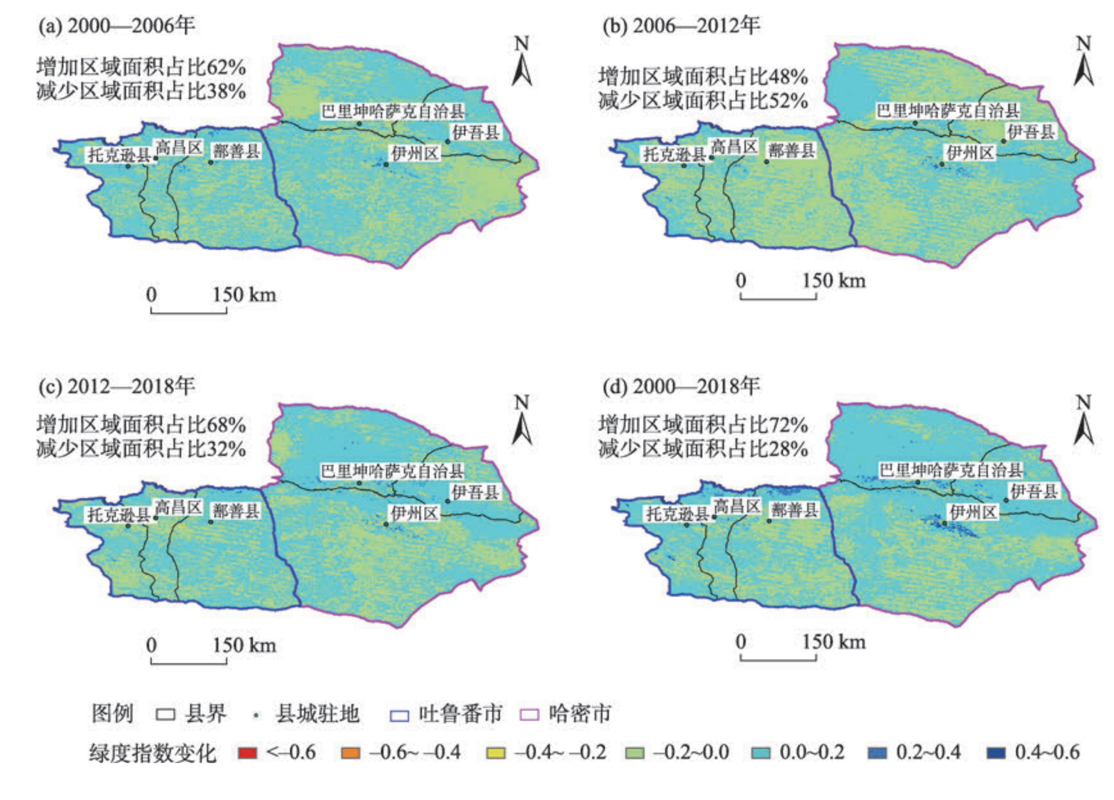


图7　不同时期吐哈地区绿度指数变化

Fig. 7　Changes of greenness index in Turpan and Hami cities at different periods

表4 不同时期吐哈地区RSEI及其协变量变化

Tab. 4 Changes of RSEI and its covariates in Turpan and Hami cities at different periods

时期	统计参量	绿度指数	湿度指数	干度指数	热度指数	RSEI
2000—2006年	均值	0.0044	−0.0024	0.0168	−0.0146	0.0069
	标准差	0.0290	0.0384	0.0184	0.0354	0.0319
2006—2012年	均值	0.0042	0.0492	−0.0313	−0.0140	0.0005
	标准差	0.0318	0.0436	0.0188	0.0347	0.0331
2012—2018年	均值	0.0157	−0.0386	0.0269	0.0045	−0.0112
	标准差	0.0409	0.0438	0.0246	0.0302	0.0350
2000—2018年	均值	0.0244	0.0082	0.0124	−0.0241	−0.0037
	标准差	0.0533	0.0413	0.0311	0.0320	0.0420

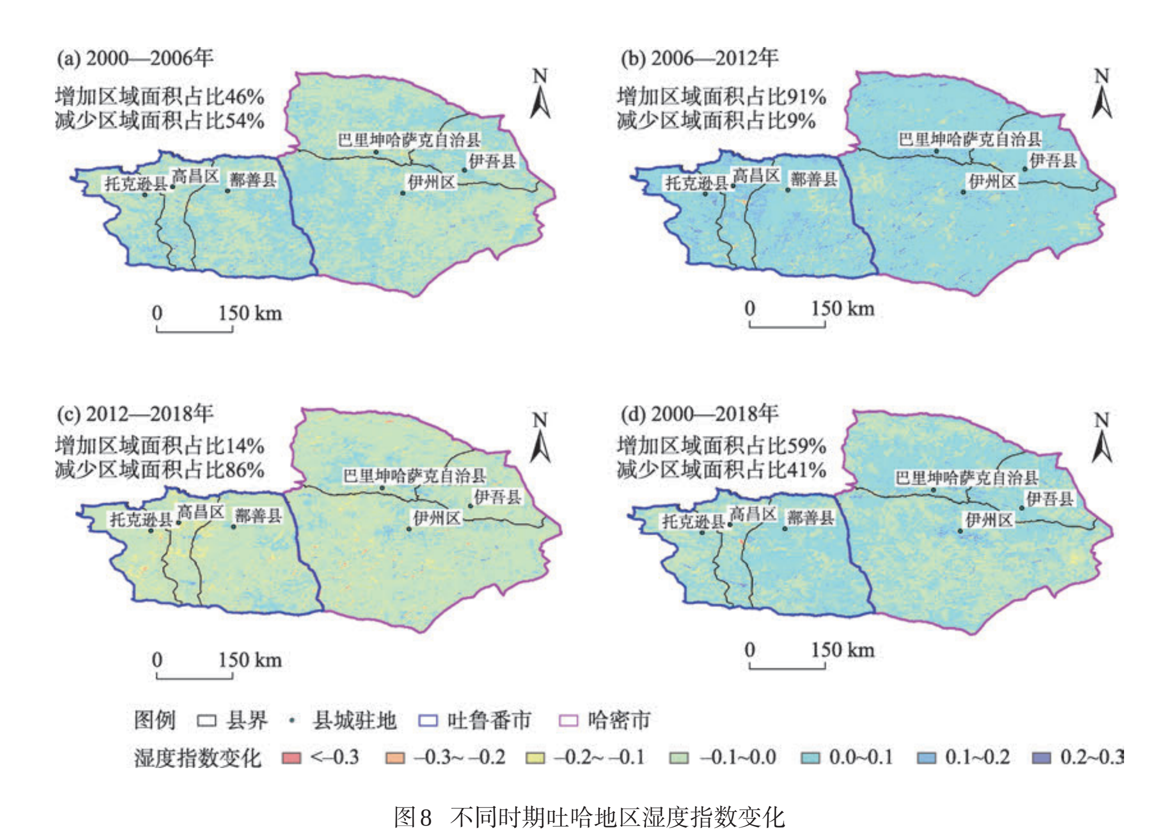


图8 不同时期吐哈地区湿度指数变化

Fig. 8 Changes of wetness index in Turpan and Hami cities at different periods

来吐哈地区有82%的区域呈现干度指数增加趋势，而哈密市中部则呈现明显的降低情况(干度指数下降超过0.4)。

与干度指数的变化情况类似(图9)，吐哈地区的热度指数2000—2006年和2006—2012年在空间上也存在相反的变化趋势(图10)。其中，在2000—2006年该地区的热度指数主要在吐鲁番市大部分地区和哈密市南部呈现降低趋势，哈密市北部呈现增加趋势。但2个时期对应的面积变化占比基本接近(2%)。从整体上看，近20 a来吐哈地区有79%的区域呈现热度指数降低趋势，其中哈密市中部和伊吾县南部的变化最为明显(<−0.15)。

对于RSEI，近20 a来吐哈地区68%的区域呈现生态环境质量略微下降的趋势(<0.1)(图11)。2000—2018年的RSEI变化量均值接近于0(表4)。哈密市中部的生态环境质量增幅最为明显(0.2~0.4)，而巴里坤哈萨克自治县的大部分地区呈现略微增加趋势(<0.1)。RSEI在2000—2006年和2006—2012年呈现相反的变化趋势，这与干度(图9)和热度指数(图10)的变化情况类似。

3.4 不同时期土地利用方式的变化

分析吐哈地区4个时期的土地利用情况发现，

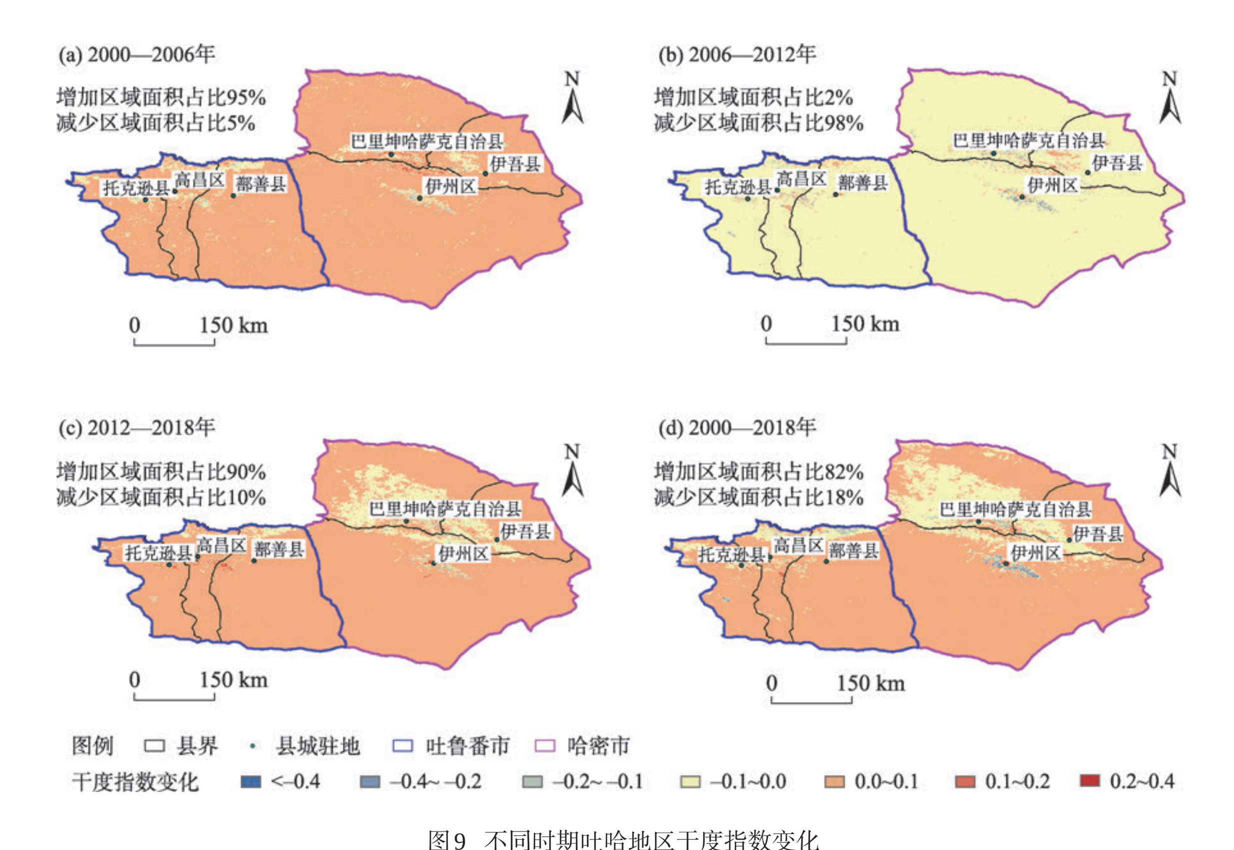


图9 不同时期吐哈地区干度指数变化

Fig. 9 Changes of dryness index in Turpan and Hami cities at different periods

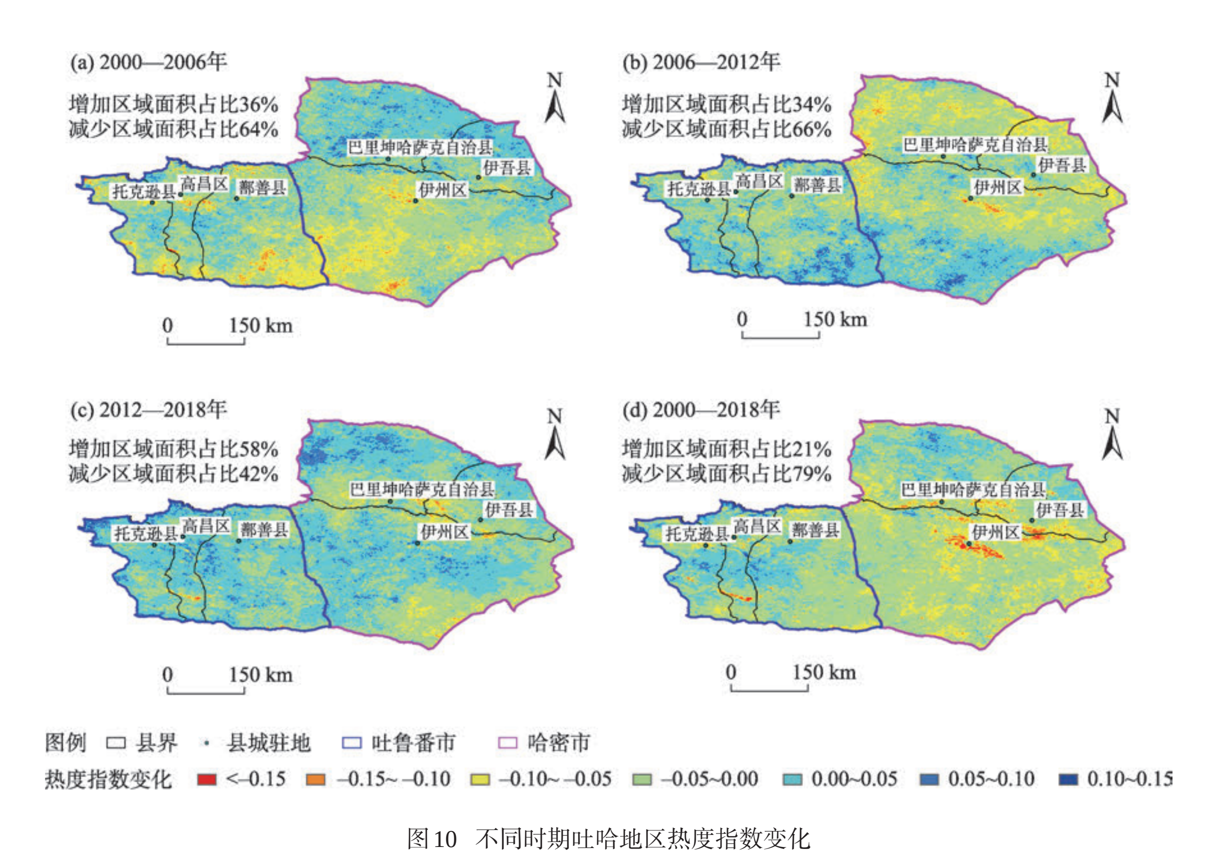


图10 不同时期吐哈地区热度指数变化

Fig. 10 Changes of heat index in Turpan and Hami cities at different periods

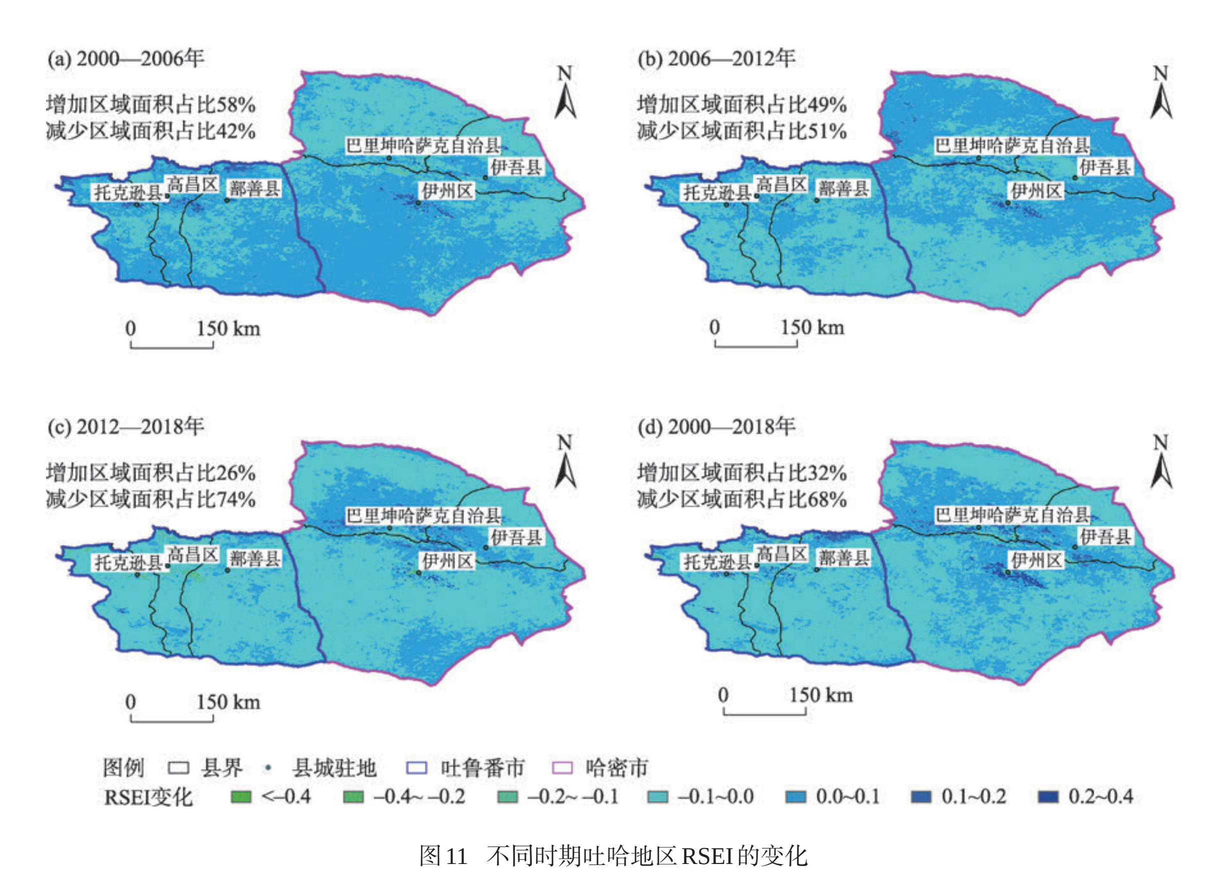


图11 不同时期吐哈地区RSEI的变化

Fig. 11 Changes of RSEI in Turpan and Hami cities at different periods

未利用占据了吐哈地区的大部分区域,其次是草地,主要集中在吐鲁番市北部和哈密市中部地区(图12)。研究发现近20 a来吐哈地区的耕地和草地面积有所增加,巴里坤湖的面积有明显萎缩趋势。

根据不同土地类型的转移矩阵本研究发现,吐哈地区近20 a草地面积增加最多,耕地次之,城乡用地最少,分别为8044 km^2、869 km^{2}和594 km^2。相反,该地区未利用地面积降低最多,林地次之,水域最少,分别减少9085 km^2、310 km^{2}和112 km^2(表5)。其中,2012—2018年的变化相对较为剧烈,其他2个时期的变化相对较为稳定。

本研究进一步分析了吐哈地区近20 a土地利用类型的转移情况。研究发现,尽管5142 km^{2}的草地退化为未利用地,但却有13483 km^{2}的未利用地被改良为草地。此外,有682 km^{2}和543 km^{2}的草地和未利用地被开垦为耕地(表6)。以上结果表明,近20 a来吐哈地区整体呈现变绿的趋势,该结果与RSEI分析结果保持一致,但未来需要减少草地开垦和过度放牧,并防止弃耕和撂荒。

4 结 论

本文基于2000、2006、2012年和2018年的4期遥感数据,反演获取了表征吐哈地区温度、绿度、湿度和干度的4个指数,通过多种计算方式构建了RSEI;并对其进行各种时空变化分析,全面探索了吐哈地区生态环境和土地利用的变化情况,为该地区高质量发展提供了有效的依据。主要研究结论如下:

(1) 利用地表温度、植物绿度、环境湿度和干度这4个协变量构建的RSEI比单一指数更能反映吐哈地区2000—2018年生态环境的变化。总的来说,近20 a吐哈地区绿度指数平均增加0.0244,湿度指数整体的变化接近于0,干度和热度指数在哈密市中部降低最为明显。

(2) 从总体而言,吐哈地区的生态环境质量呈现略微下降的趋势(<0.1),其中,吐鲁番市的鄯善县RSEI变化幅度最大,环境质量下降的最多,而哈密市的巴里坤县的环境质量减少的幅度最小。

图12 不同时期吐哈地区土地利用分类

Fig. 12 Land use classification in Turpan and Hami cities at different periods

表5 吐哈地区不同土地利用类型面积统计

Tab. 5 Area statistics of different land use types in Turpan and Hami cities /km²

土地利用类型	2000年	2006年	2012年	2018年
耕地	2216	2285	2322	3085
林地	873	877	869	563
草地	30336	30352	30353	38380
水域	412	427	441	300
城乡用地	399	403	704	993
未利用地	172550	172598	172253	163465

表6 2000—2018年土哈地区不同土地利用类型转移面积

Tab. 6 Transfer area of different land use types in Turpan and Hami cities from 2000 to 2018 /km²

2000年	2018年						
	耕地	林地	草地	水域	城乡用地	未利用地	合计
耕地	1636	4	327	4	124	121	2216
林地	130	152	442	1	13	135	873
草地	682	322	24028	41	121	5142	30336
水域	12	0	84	102	1	213	412
城乡用地	82	1	16	0	161	139	399
未利用地	543	84	13483	152	573	157715	172550
合计	3085	563	38380	300	993	163465	–

（3）热度指数是主导吐哈地区生态环境质量变化的主控因子。虽然近20 a来，吐哈地区整体呈现变绿的趋势，但未来仍然需要控制草地开垦及过度放牧。

参考文献（References）

[1] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态

经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 19-25. [Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 19-25.]

[2] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J]. 地理研究, 2003, 22(2): 211-220. [Huang Jinchuan, Fang Chuanglin. Analysis of coupling mechanism and reles between urbanization and eco-enviroment[J]. Geographical Research, 2003, 22(2): 211-220.]

[3] 刘纪远, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究——基于卫星遥感数据[J]. 第四纪研究, 2000, 20(3): 229-239. [Liu Jiyuan, Buheaosier. Study on the spatial-temporal feature of modern land-use change in China: Using remote sensing techniques[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(3): 229-239.]

[4] 顾留碗, 潘立新, 王帅帅, 等. 以土地利用为基础的安徽省生态评价遥感信息模型[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 340-344, 350. [Gu Liuwan, Pan Lixin, Wang Shuaishuai, et al. Remote sensing information model for ecological quality assessment in Anhui Province based on land use[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(5): 340-344, 350.]

[5] 戚曌, 于新文, 谭炳香, 等. 神农架地区生态环境遥感监测与恢复治理评价[J]. 林业科学研究, 2021, 34(6): 90-98. [Qi Zhu, Yu Xinwen, Tan Bingxiang, et al. Remote sensing monitoring and restoration evaluation of ecological environment in Shennongjia Area [J]. Forest Research, 2021, 34(6): 90-98.]

[6] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862. [Xu Hanqiu. A remote urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853-7862.]

[7] 周萌, 刘友存, 孟丽红, 等. 基于遥感生态指数的东江源区2000—2019年生态环境质量评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 231-240. [Zhou Meng, Liu Youcun, Meng Lihong, et al. Evaluation of ecological environment quality of Dongjiang River Headwaters based on remote sensing ecological index during 2000—2019[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 231-240.]

[8] 徐敏, 陈俊, 邓嘉翔, 等. 基于遥感生态指数的滁州市生态环境变化分析[J]. 地矿测绘, 2021, 37(2): 21-24. [Xu Min, Chen Jun, Deng Jiaxiang, et al. Analysis of ecological environment changes in Chuzhou City based on remote sensing ecological index[J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 2021, 37 (2): 21-24.]

[9] 何洪林, 彭补拙, 王良健, 等. 吐鲁番水土资源开发利用动态分析[J]. 山地研究, 1998(3): 198-204. [He Honglin, Peng Buzhuo, Wang Liangjian, et al. The studies on the dynamic imitation for utilization of water and land resources in Turpan City[J]. Mountain Research, 1998(3): 198-204.]

[10] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊. 新疆雪冰水资源的环境评估[J]. 干旱区研究, 2003, 20(3): 187-191. [Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun. Assessment on the glacial water resources in Xinjiang, China[J]. Arid Zone Research, 2003, 20(3): 187-191.]

[11] 阿依努尔·麦提努日, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 麦尔哈巴·图尔贡, 等. 吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属铅含量高光谱估算[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(2): 362-371. [Medinur Ainur, Azezi Mediturson, Turgon Merhaba, et al. Hyperspectral estimation of heavy metal Pb concentration in vineyard soil in Turpan Basin[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(2): 362-371.]

[12] 马子龙, 毛潇萱, 丁中原, 等. 新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1120-1128. [Ma Zilong, Mao Xiaoxuan, Ding Zhongyuan, et al. Residual levels in air, soil and soil-air exchange of organochlorine pesticides in Hami Region of Xinjiang and its potential ecological risk[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1120-1128.]

[13] 宋慧敏, 薛亮. 基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3913-3919. [Song Huimin, Xue Liang. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Weinan City, northwest China based on RSEI model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 3913-3919.]

[14] 王丽春, 焦黎, 来风兵, 等. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2963-2972. [Wang Lichun, Jiao Li, Lai Fengbing, et al. Evaluation of ecological changes based on a remote sensing ecological index in a Manas Lake wetland, Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): 2963-2972.]

[15] 孟岩, 赵庚星, 程晋南, 等. 基于MODIS遥感数据和GIS的山东省生态环境状况评价[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 1020-1024. [Meng Yan, Zhao Gengxing, Cheng Jinnan, et al. Evaluation of ecological environment of Shandong Province using MODIS data and GIS platform[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(4): 1020-1024.]

[16] Xu H Q, Wang Y F, Guan H D, et al. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis[J]. Remote Sensing, 2019, 11(20): 2345, doi: 10.3390/rs11202345.

[17] 李博伦, 遆超普, 颜晓元. Landsat 8陆地成像仪影像的缨帽变换推导[J]. 测绘科学, 2016, 41(4): 102-107. [Li Bolun, Ti Chaopu, Yan Xiaoyuan. Study of derivation of tasseled cap transformation of Landsat 8 OLI images[J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(4): 102-107.]

[18] 王正兴, 刘闯, Huete Alfredo. 植被指数研究进展: 从AVHRR-NDVI到MODIS-EVI[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987. [Wang Zhengxing, Liu Chuang, Huete Alfredo. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 979-987.]

[19] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data,

2021, 13(8): 3907–3925.

[20] 刘瑞, 朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1544–1550. [Liu Rui, Zhu Daolin. Methods for detecting land use changes based on the land use transition matrix[J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1544–1550.]

[21] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 54–63. [Wu Linna, Yang Shengtian, Liu Xiaoyan, et al. Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo River Basin since 1976[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 54–63.]

[22] 帕茹克·吾斯曼江, 郝晋珉, 王楠, 等. 基于"三生"功能的土地利用转型及其生态环境效应——以尉犁县为例[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1612–1622. [Wusimanjiang Parruk, Hao jinmin, Wang Nan, et al. Land use transformation based on production-living-ecological functions and associated eco-environment effects: A case study in Yuli County[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1612–1622.]

[23] 刘畅, 李诚志, 李胜辉, 等. 基于栅格累加法的塔里木盆地沙漠化分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 197–207. [Liu Chang, Li Chengzhi, Li Shenghui, et al. Desertification analysis based on grid accumulation method in Tarim Basin, China[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 197–207.]

[24] 杨国清, 刘耀林, 吴志峰. 基于CA-Markov模型的土地利用格局变化研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(5): 414–418. [Yang Guoqing, Liu Yaolin, Wu Zhifeng. Analysis and simulation of land-use temporal and spatial pattern based on CA-Markov model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(5): 414–418.]

Change of ecological environment in Turpan and Hami cities based on remote sensing ecology index

WANG Jinjie[1,2,3], DING Jianli[1,2,3], ZHANG Zipeng[1,2,3]

(1. College of Geographical and Remote Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China; 3. Key Laboratory of Smart City and Environment Modelling of Higher Education Institute, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

Abstract: It is important to make an objective and comprehensive evaluation of the quality of the ecological environment for ecological civilization construction. Using four indicators of humidity, dryness, heat, and greenness, the remote sensing ecology index (RSEI) was established and plotted to characterize Turpan and Hami cities of Xinjiang, China in 2000, 2006, 2012, and 2018, based on the multispectral sensor, moderate resolution imaging spectroradiometer. Additionally, the ecological environment quality and land use conversion in the region were quantitatively analyzed. The spatial-temporal variation changes in the ecological environment and land use in Turpan and Hami cities were analyzed and evaluated using the principal component analysis method to construct remote sensing ecological indices and statistical analysis. The results show that in the past 20 years, the greenness index of Turpan and Hami cities has increased by 0.0244 on average, the heat index has decreased by 0.0241 on average, and the overall changes in humidity and dryness index are close to 0. Among them, the heat index has the strongest negative correlation with RSEI. In general, the eco-environmental quality of Turpan and Hami cities showed a slight downward trend from 2000 to 2018. Among them, the change range of RSEI in Shanshan County of Turpan City was the largest, and the environmental quality decreased the most, while the range of the decrease in environmental quality in Barkol Kazak Autonomous County of Hami City was the smallest. Although the grassland area in this area has expanded significantly in the past 20 years, it is still necessary to control grassland reclamation and overgrazing in the future.

Key words: remote sensing ecology index; MODIS data; spatial-temporal variation; Turpan City; Hami City